

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國小組 物理科

最佳創意獎

080110

漫步在雲端乾冰塑 TAIWAN

學校名稱：雲林縣斗六市石榴國民小學

作者：	指導老師：
小五 李昕宇	吳承典
小五 陳冠丞	江佩蓉
小五 陳郁玟	
小五 楊侑益	
小五 張欣螢	
小五 張勝凱	

關鍵詞：乾冰、凝固、熱傳導

# 漫步在雲端 乾冰塑 TAIWAN

## 摘要

本實驗運用乾冰低溫特性，進行昇華、擴散及讓液體結冰的直接觀察研究。研究中發現乾冰置放在金屬材質上冷卻效應較佳；在木質桌面降溫的程度較低。乾冰邊角上因為二氧化碳冷氣流產生**渦旋現象**而讓水滴最慢結冰；又因為結冰順序的影響，造成冰滴尖端呈現向外放射狀現象。將蒸餾水、糖水、硫酸銅溶液及鹽水分別滴入四面乾冰牆中間，可以觀察到液滴快速結成**斗笠狀、扁桃狀、鍋蓋狀及結晶花**等不同變化。最後利用烙印原理，將不同的色素溶液滴入台灣形狀凹槽的乾冰上，有長出中央山脈的台灣、也有美麗的結晶花夜空，更進一步利用乾冰碎塊做出大海環繞的福爾摩沙。「漫步在雲端，乾冰塑台灣」科技與人文創意的連結，浪漫而炫麗地呈現在我們眼前。

## 壹、研究動機










去年老師帶我們到彰化參觀科展，我們對一個題目感到非常有興趣，那就是國小物理科的”不可思議的小尖「冰」～探討水珠結冰的特殊現象。”我們看到水珠結冰的冰尖凸圖片感到非常驚奇，由於實驗必須放入冰箱冷凍庫中操作，無法直接觀察，老師便提出「**如何讓水滴在我們眼前結冰**」的難題，沒想到有著豐富科學知識的小宇，想到了用”**乾冰!**”的妙招，問題馬上迎刃而解。

配合著三年級讀過**水的三態變化**和五年級上到的**熱傳導**等單元，我們認真地用乾冰做了許多的實驗。從觀察到運用，在親眼看見結冰過程的想法中，開啟了本次科學研究的主題，也從乾冰物理特性的認識，再運用霧狀水滴的漂移累積，「驗證」氣體的**擴散**作用。透過一連串有趣的結冰實驗設計發想，運用有關乾冰冷卻液體的原理，一步一步地往「**用乾冰做台灣**」的目標前進。

## 貳、研究目的

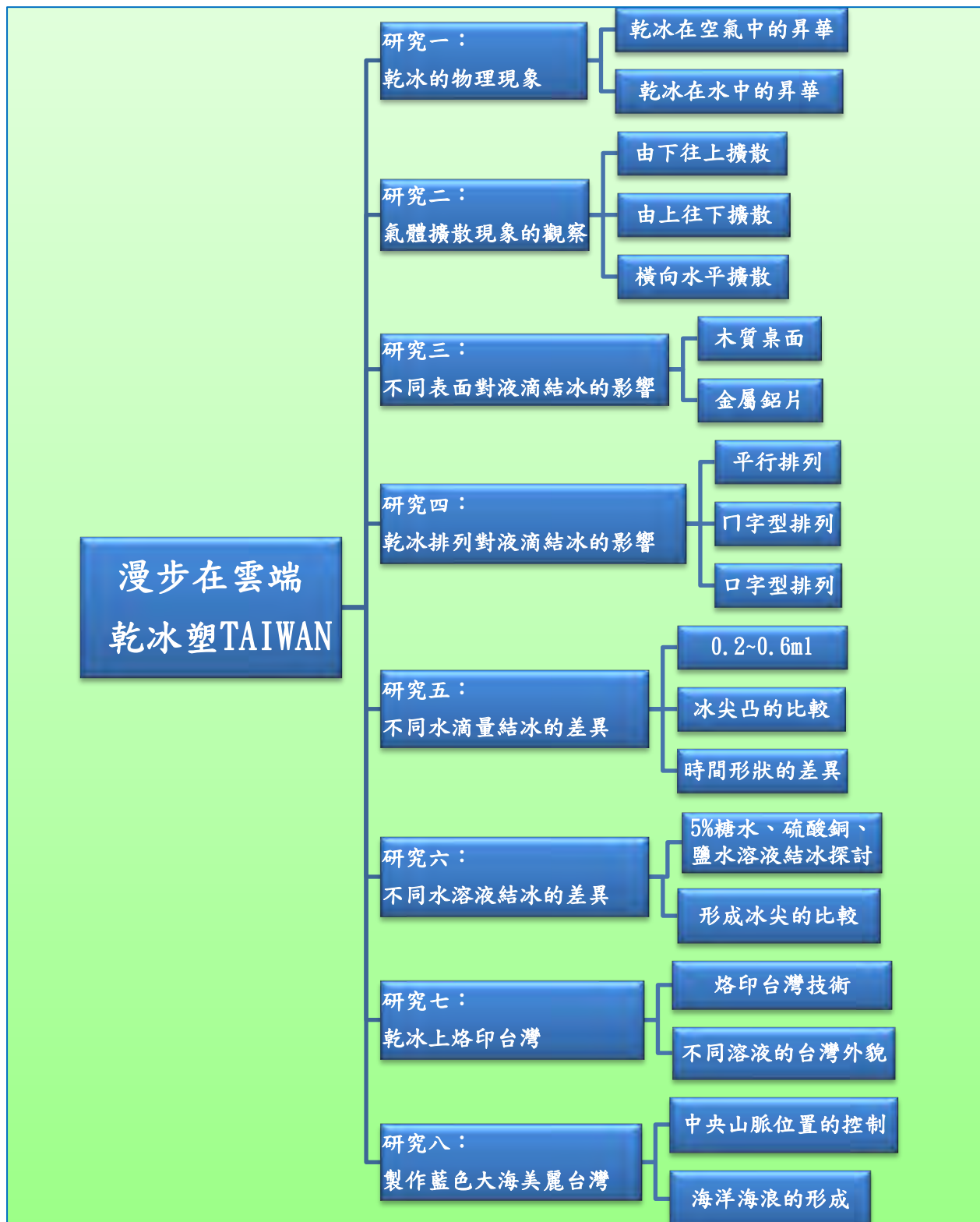
- 一、了解乾冰的物理特性。
- 二、觀察乾冰昇華時的擴散現象。
- 三、比較不同介質表面對水滴結冰的影響。
- 四、比較不同乾冰牆排列對水滴結冰的影響。
- 五、分析不同水溶液的液滴量在結冰過程的差異。
- 六、分析不同水溶液結冰形狀的差異。
- 七、探討如何在乾冰上烙印台灣形狀讓水溶液結冰。
- 八、探討如何完成藍色大海美麗台灣。

### 叁、研究器材與設備

		
<p>鐵鎚鑿子切割乾冰</p>	<p>乾冰塊</p>	<p>吸球滴管、夾子</p>
		
<p>游標卡尺</p>	<p>蠟燭、打火機、鋁片</p>	<p>各種染色溶液</p>
		
<p>磅秤</p>	<p>測溫槍</p>	<p>-100°C~100°C 的溫度感應器、數據記錄器及電腦</p>
<p>其他各項器材分別為：自製透明 PET 塑膠圓筒(10cm 直徑、120cm 長)、金屬鋁片、細尖鑷子、普通 3ml 塑膠滴管、精密天秤、精密 1ml 的玻璃滴管、圓形蓋玻片 (15mm 直徑)、紙杯、黏土、大塑膠罐蓋子、食用色素(綠色、藍色、橘色、紫色)、蒸餾水、重量百分率 5%糖水溶液、重量百分率 5%鹽水溶液、重量百分率 5%硫酸銅溶液。</p>		

## 肆、研究過程或方法

### 一、研究架構思維導圖：



## 二、研究過程與方法：

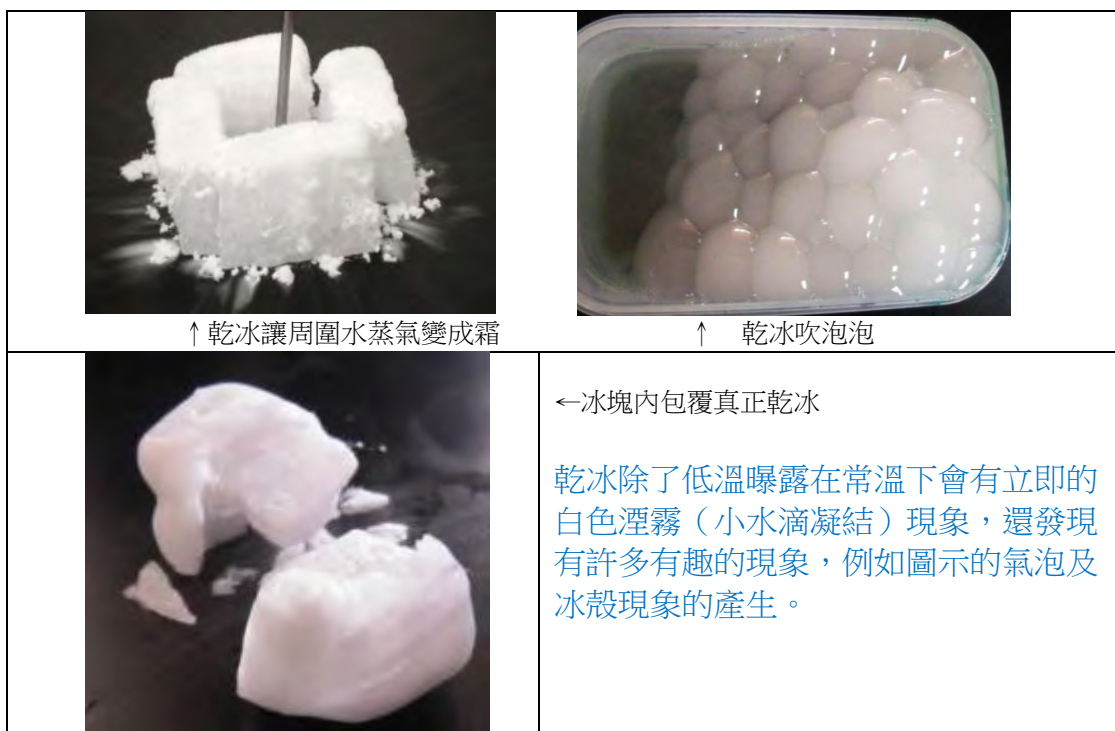
### 【研究一】探討乾冰在空氣中與在水中的昇華情形

#### (一) 研究設計與實驗方法：

- 1.切取塊狀乾冰放置在**木桌**上，觀察其發生的變化。
- 2.切取塊狀乾冰放入**水中**的話，觀察其發生的變化。
- 3.將一塊先前放入水中一段時間後不再有煙霧的乾冰取出，觀察並探討它的改變

#### (二) 實驗結果討論：

- 1.乾冰是固態的二氧化碳，在常溫中會快速吸收周圍環境的熱能，讓周圍的水蒸氣凝結成小水滴，所以看起來會一直冒白煙。時間愈久乾冰也會愈變愈小，周圍桌面還是乾乾的，但是感覺到冰冰的。
- 2.乾冰放入水中會不斷地從水中冒出氣泡，如果放在肥皂水中，可以冒出很多泡泡。**肥皂水泡泡中包著二氧化碳氣體**，昇華時間愈久，乾冰體積也會愈小。
- 3.乾冰周圍的水因為極低溫的作用，造成**乾冰表面的水結冰**，**用鐵槌敲碎後會發現真正的乾冰變小，被包覆在裡面**。如下圖所示。



#### (三) 結論：

乾冰是固體二氧化碳，凝固點  $-78.5^{\circ}\text{C}$ ，放在室溫會一直昇華成二氧化碳氣體，低溫的二氧化碳會讓周圍的水蒸氣凝結成小水滴，所以看起來一直冒白煙。而昇華過程，也不像冰塊一樣溼答答的，所以俗稱乾冰。

## 【研究二】設計實驗，透過乾冰昇華過程觀察氣體擴散現象。

### (一) 研究設計與實驗方法：

- 1.設計原理：將水倒入裝有乾冰的容器中，昇華過程會產生二氧化碳及白色水霧，可方便進行擴散觀察。同時配置燭台，觀察由下往上、由上往下及橫向平躺的圓筒內，二氧化碳水霧擴散導致熄滅燭火所需的時間。
- 2.器材設計：
  - (1)將 PET 透明塑膠薄膜，捲成直徑 10cm、長 150cm 的圓筒以雙面膠固定。
  - (2)圓筒一端以鐵絲做成一個托放小蠟燭的燭台，另一端做成可與圓筒密合的乾冰水杯備用。
- 3.材料使用：
 

以 2x2x2 公分乾冰塊秤重 60 g 放入紙杯中，另一紙杯秤重 60g 水備用。
- 4.操作方式：
 

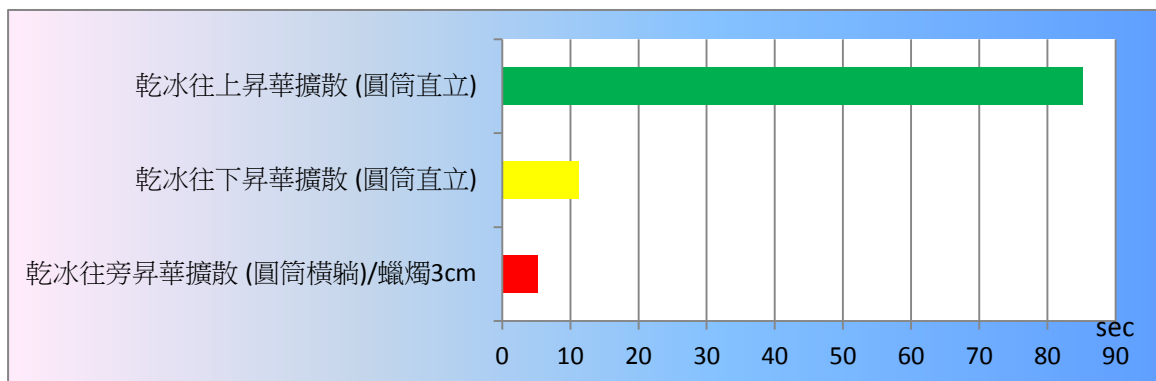
分別在圓筒直立下到上、直立上到下及橫向平躺的空間內進行擴散觀察。備好計時器，將乾冰倒入塑膠蓋上的紙杯中，再倒入 60g 的水，將直立的圓筒對準移至塑膠蓋上，立刻讓圓筒鑲入樹脂土內迅速封邊並計時，點燃頂端的蠟燭，記錄蠟燭多久的時間會熄滅。
- 5.觀察乾冰昇華成二氧化碳的擴散情形，記錄蠟燭熄滅時間，重複實驗五次求時間的平均值。

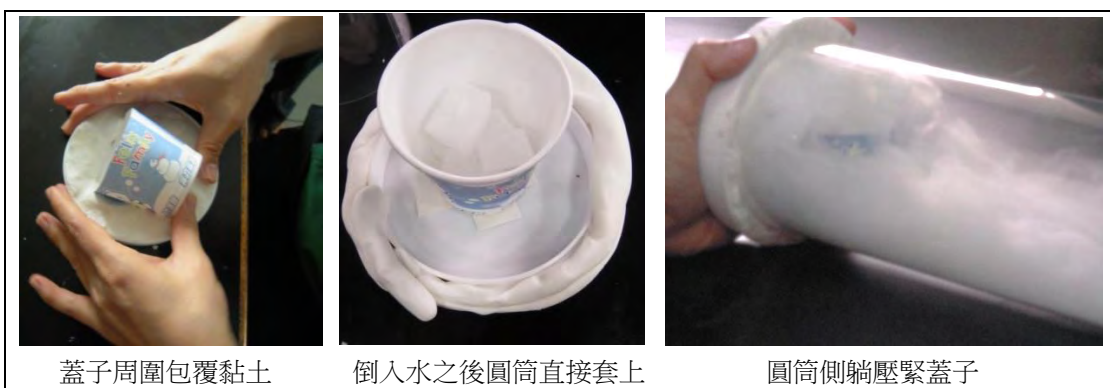
### (二) 實驗觀察結果：

乾冰昇華擴散時間實驗觀察記錄分析

單位：sec 沒有熄滅：---

方法	實驗次數					平均
	t1	t2	t3	t4	t5	
乾冰往上升華擴散 (圓筒直立)	85	84	87	84	86	85.2
乾冰往下昇華擴散 (圓筒直立)	11	11	12	11	11	11.2
乾冰往旁昇華擴散 (圓筒橫躺)/蠟燭 3cm	5	5	5	5	6	5.2
乾冰往旁昇華擴散 (圓筒橫躺)/蠟燭 5cm	---	---	---	---	---	---
乾冰往旁昇華擴散 (圓筒橫躺)/蠟燭 7cm	---	---	---	---	---	---





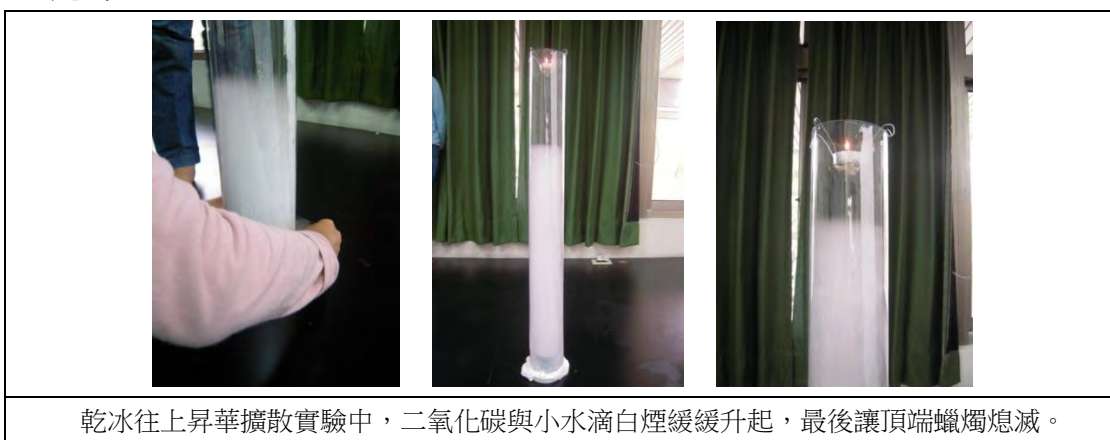
蓋子周圍包覆黏土

倒入水之後圓筒直接套上

圓筒側躺壓緊蓋子

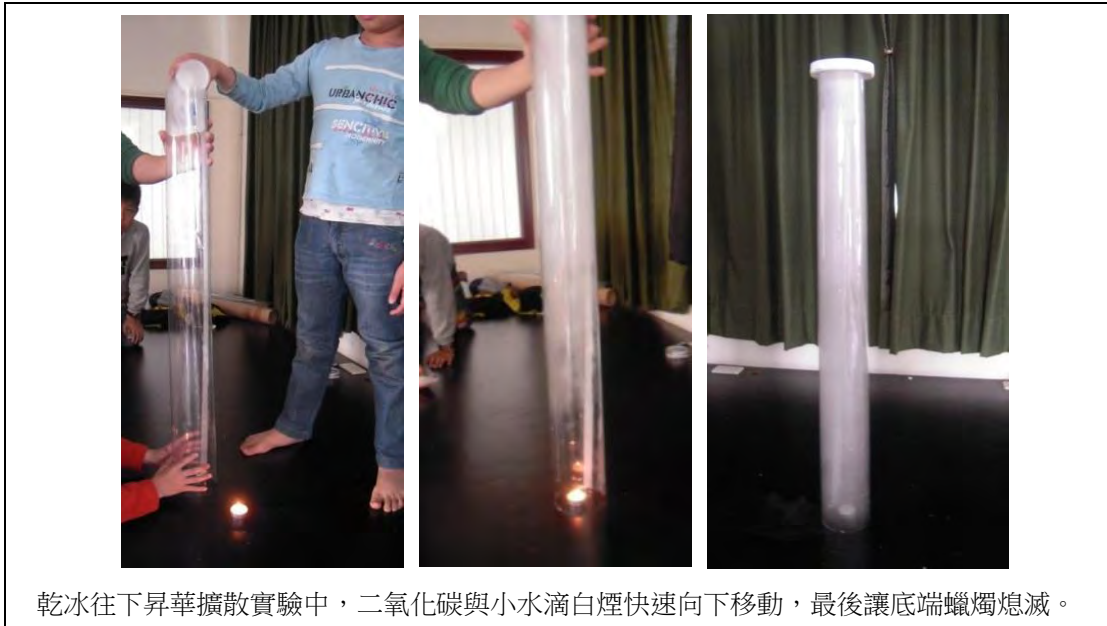
### (三) 實驗結果討論：

1. 向上擴散的實驗觀察發現，乾冰昇華往上擴散的時間比往下擴散的時間慢很多，將近慢八倍之多。因為昇華後的二氧化碳比空氣重，在往上擴散時呈現的是一種累積向上的過程。且低溫的二氧化碳經過時會冷卻周圍的水蒸氣變成小水滴，看起來就像一縷白煙緩緩升起。如下圖所示。二氧化碳往上擴散讓人感覺很扎實且時間緩慢。我們發現將每塊乾冰的體積盡量控制在 8 立方公分正方體時，蠟燭熄滅的時間一致性很高，得到的數據應該是很可靠的。取 60g 的乾冰與 60g 的水是為了增加濕度，讓二氧化碳冷卻水蒸氣後白色小水滴便於觀察所固定的量。



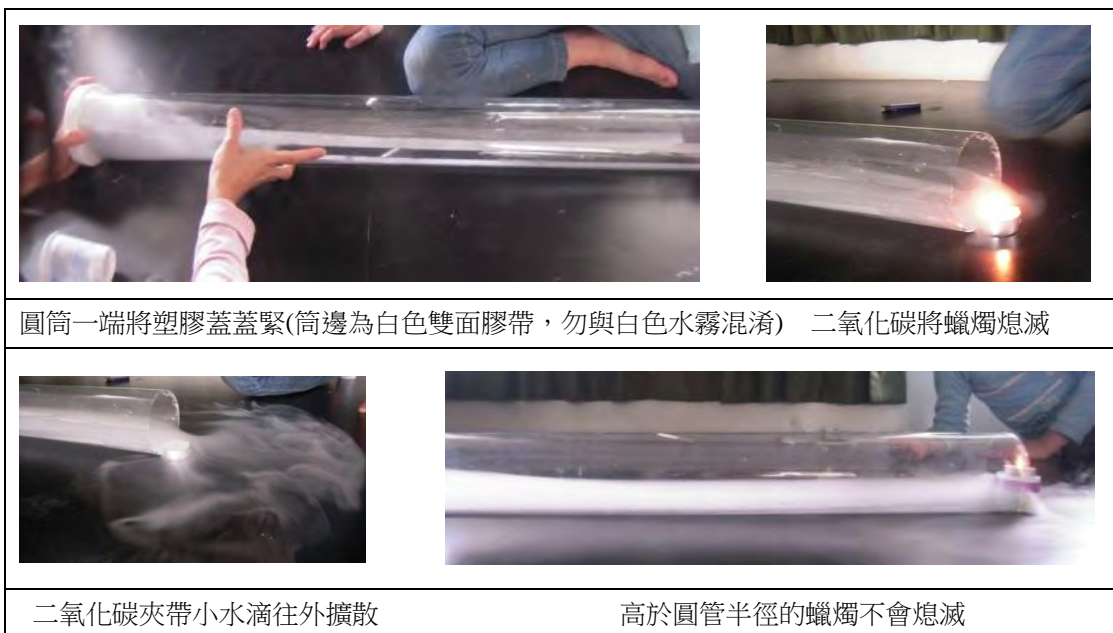
乾冰往上升華擴散實驗中，二氧化碳與小水滴白煙緩緩升起，最後讓頂端蠟燭熄滅。

2. 向下擴散的實驗中，乾冰昇華成二氧化碳會快速往下擴散，約在 11、12 秒時就讓蠟燭熄滅。二氧化碳產生後並不是填滿塑膠圓管管壁才往下降，而是直接往下降，有一點像亂流一樣，白色被冷卻的小水滴也不紮實，所以感覺沒有像往上的擴散實驗一樣有一層明顯的切面。如下圖所示。



乾冰往下昇華擴散實驗中，二氧化碳與小水滴白煙快速向下移動，最後讓底端蠟燭熄滅。

3.橫向擴散實驗中，橫躺圓筒內的二氧化碳擴散方式更是奇特，是以管徑不到一半的高度向外飄散，從被冷卻的小水滴形成一層平流層的白雲可以得知。因此，操作過程中燭火高度為 3cm 時，順利被二氧化碳所熄滅。當燭火高度高於管口半徑時，例如 5cm、7cm 時，蠟燭一直都不會被二氧化碳熄滅。如下圖所示。



圓筒一端將塑膠蓋蓋緊(筒邊為白色雙面膠帶，勿與白色水霧混淆) 二氧化碳將蠟燭熄滅

二氧化碳夾帶小水滴往外擴散

高於圓管半徑的蠟燭不會熄滅

#### (四) 結論：

由以上的實驗得知二氧化碳比空氣重，透過昇華過程讓水蒸氣凝結成白色霧滴的流動軌跡，清楚地顯示其擴散都是向下沉、向外擴。值得一提的是燭火熄滅的原因不是白霧，而是二氧化碳覆蓋了火源，阻斷了燃燒的要素氧氣的提供。

乾冰昇華時除了讓周圍的環境冷卻形成我們所看到的白色小水滴煙霧，也發



現到二氧化碳是會往下沉的。如果把乾冰放在桌子上，昇華的二氧化碳會往四周放射散去。如果將乾冰放在一攤色素水中間，我們可以用肉眼看到水結成冰時，無法溶入水裡的二氧化碳氣泡，會不斷地向外擴散，氣泡來不及跑走時，就會結成美麗的放射狀冰針。如下圖所示。此時我們腦中突然有浮現靈感，想到了下一個研究探討的內容。



乾冰使色素水結冰的實驗照片

### 【研究三】不同材質上，乾冰使液滴結冰之觀察

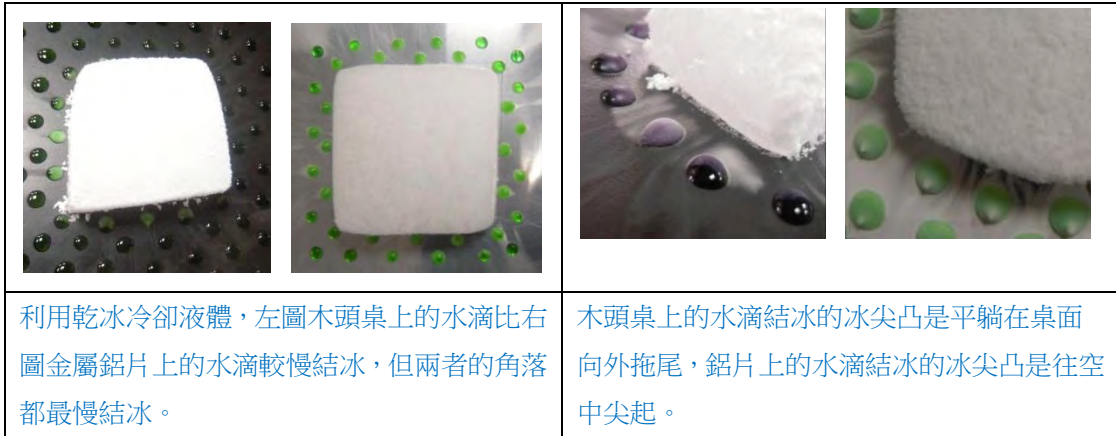
#### (一) 實驗設計與方法

- 1.切兩塊  $4\text{cm}\times 4\text{cm}\times 4\text{cm}$  的正立方體乾冰，分別將乾冰放在木質桌面上與金屬材質鋁片上，分別在周圍滴上兩圈小水滴，觀察液體在木質桌面上與金屬材質鋁片上的結冰情形。
- 2.使用紅外線測溫槍，在乾冰放置 3 分鐘後，量測距離乾冰周圍 0.5cm 及 1cm 之 4 個角落及 4 個邊長中點位置的溫度。
- 3.延伸設計以連結電腦的專業溫度監控儀，分析乾冰角落與邊長中點位置，經過 10 分鐘後的溫度變化情形。



#### (二) 實驗觀察結果：

- 1.兩組實驗水滴結冰時都現四個角落的水滴都最慢結冰的有趣現象。另一個更特殊的差異，則是木桌上的水滴結冰時會長出像彗星的尾巴，冰尖凸往外拖尾(躺平)而且結冰速率較慢；在金屬鋁片上的液體很快就會結冰，而且冰尖凸往空中尖起(直立)。



利用乾冰冷卻液體，左圖木頭桌上的水滴比右圖金屬鋁片上的水滴較慢結冰，但兩者的角落都最慢結冰。

木頭桌上的水滴結冰的冰尖凸是平躺在桌面向外拖尾，鋁片上的水滴結冰的冰尖凸是往空中尖起。

2.我們使用紅外線測溫槍，可以瞬間測出物體的表面溫度。以測溫槍量測兩種不同材質的溫度，發現角落測得的溫度均高於邊長中點所測得的溫度。量測記錄結果如下：

置放材質 乾冰距離		桌面上		金屬鋁片上	
		0.5 cm	1.0 cm	0.5 cm	1.0 cm
等距不同點					
四邊長中點處 °C	中 1	-7	-2	-35	-23
	中 2	-6	0	-32	-21
	中 3	-7	1	-34	-23
	中 4	-6	-1	-31	-22
	平均	<b>-6.5</b>	<b>-0.5</b>	<b>-33</b>	<b>-22.3</b>
四角落處 °C	角 1	-3	10	-25	-11
	角 2	-5	9	-22	-13
	角 3	-2	11	-26	-13
	角 4	-4	11	-24	-12
	平均	<b>-3.5</b>	<b>10.3</b>	<b>-24.3</b>	<b>-12.3</b>

單位：°C 時間：靜置 10 分鐘

測量結果發現，**不管在木頭桌上或是鋁片上，角落處的溫度都比邊長中間高。**木頭桌面離乾冰 1cm 的水滴經過 **10 分鐘**後，角落處 **10.3°C**，而邊長中間卻是 **-0.5°C**，實驗過程發現木頭桌上在 1 公分角落處的水滴不易結冰。

量距離乾冰約 0.5cm 的內圈水滴，中間處約 **-6.5°C**，角落處 **-3.5°C**。角落處的水滴才會結冰。至於金屬鋁片上的溫度，經過 10 分鐘後，距乾冰 1cm 的位置邊長中間測得溫度 **-22.3°C**，角落處還有 **-12.3°C**，所以**鋁片上的水滴都比木頭上的水滴更快結冰**。以溫度監控分析儀器，進一步監控與記錄溫度變化，如下圖所示。

	量測四邊長的中間點	量測四邊角
木質桌面	<p>木桌乾冰邊長中間20130321.grp</p>	<p>木桌乾冰角落20130321.grp</p>
結果	木頭桌面距乾冰 1 公分的邊長中間，量測的溫度曲線平滑，約 8 分 20 秒到達 0°C，且 10 分鐘時溫度接近 -0.5°C。	木頭桌面距乾冰 1 公分的角落，量測的溫度曲線很平滑，無法到達 0°C，且 10 分鐘後最終溫度接近 10°C。
墊金屬鋁片	<p>鋁片乾冰邊長中間.grp</p>	<p>鋁片乾冰角落20130321.grp</p>
結果	金屬鋁片上距乾冰 1 公分的邊長中間，量測的溫度曲線較陡，時間較快到達 0°C(約 1 分鐘時)，且最終溫度接近 -22.5°C。	金屬鋁片上距乾冰 1 公分的角落，量測的溫度曲線較平緩些，時間較慢到達 0°C(約 2 分鐘)，且最終溫度接近 -12°C。

### (三) 實驗結果討論

1. 實驗過程發現，木頭桌面在 1 公分角落處的水滴不易結冰。水滴靠近乾冰約在 0.5cm 距離，中間處約 -6.5°C，角落處 -3.5°C。角落處的水滴才會結冰。顯示承載乾冰的平台材質與距離確實影響了溫度的傳導及冷流的帶動。
2. 金屬鋁片上的溫度經過 10 分鐘後，距乾冰 1cm 的邊長中間測得溫度 -22.3°C，角落處還有 -12.3°C，愈靠近乾冰溫度愈低，所以鋁片上的液體都比木頭上的液體更快結冰。
3. 兩種材質冰尖凸都向外，這可能與乾冰熱傳導與冷氣流流向的影響有關。
4. 乾冰放在金屬鋁板上，能快速傳遞低溫冷卻的效果。市售有一種解凍盤，就是將冷凍魚肉放在解凍金屬盤上，因為熱傳導快速，一小時後就能快速解凍。

### (四) 結論

乾冰造成水滴結冰的方式有兩種：一種是桌面接觸面的熱傳導導致水滴冷卻結冰；另一種是乾冰昇華時往四周圍擴散，產生冷卻的氣流讓水滴結冰。這兩種方式的熱傳導都會讓水滴結冰，木頭桌面的熱傳導效率和對流效率在競爭，木頭

桌面的熱傳導並不快速，冷氣流的風向影響了冰體的尖凸方向，所以水滴結冰成彗星拖尾的平躺形狀。

當桌面墊上一種熱傳導速率較快的金屬鋁片，我們發現鋁片上所有水滴都是形成往空中尖起的冰尖凸，而不是平躺在鋁片上的彗星拖尾狀，結冰的時間非常快且結冰的範圍也非常廣。若刻意將某些水滴一半接觸面積在鋁片上，另一半落在木材桌面上，則水滴也產生平躺拖尾現象。如下圖所示。

至於在四個角落處水滴都較慢結冰，可能是乾冰昇華的二氧化碳在角落處擴散的方向較不一致，比較容易有渦流的問題發生，所以氣流冷卻效率才會受到影響，降低了冷卻的結果，也因為四個角落處的熱傳導效率較差，導致水滴較慢結冰。



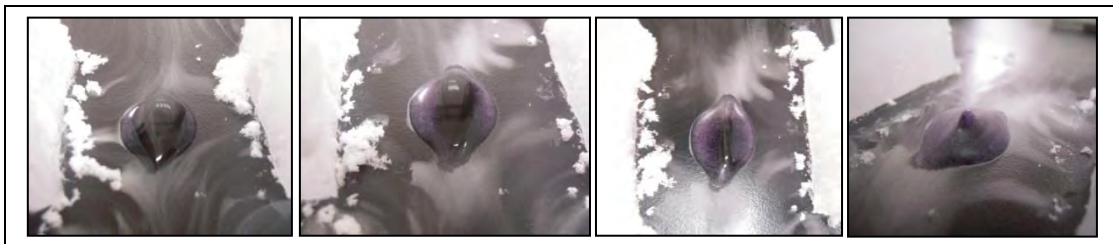
#### 【研究四】乾冰牆的排列方式對水滴結冰之影響

##### (一) 研究設計與方法

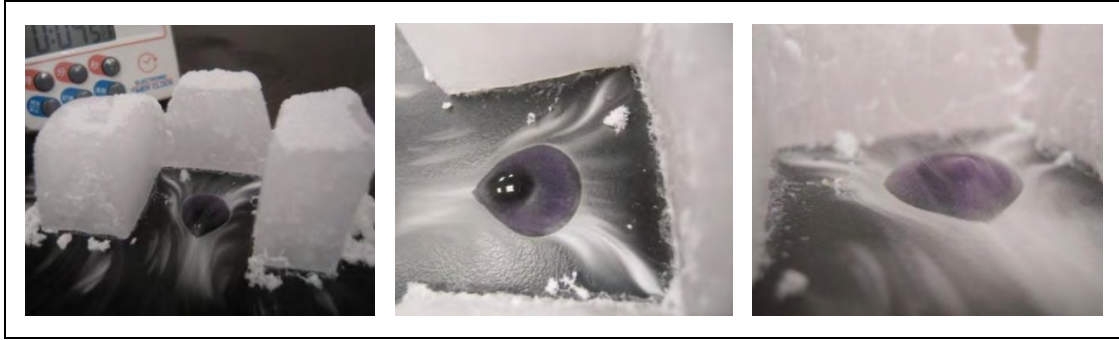
1. 實驗素材：截切 4cm 長×4cm 寬×2cm 厚的長方體乾冰依不同實驗需求排放。
2. 將 4 平方公分正方形乾冰牆直立，分別做左右平行、三塊「」字型排列，分別在中間滴入一大滴染色水滴，觀察水滴在木頭桌面上的結冰情形。

##### (二) 實驗結果：

1. 乾冰平行排列時，結冰時呈現兩頭水平尖凸，中間往上的冰尖凸，如下圖所示。



2. 排成「」字型時，結冰出現兩個尖凸，一個指向缺口水平尖凸，一個在缺口處向上拉起。如下圖所示。



### (三) 研究討論

- 1.乾冰**平行**排列時，水滴受到兩面乾冰牆昇華成二氧化碳的冷氣流冷卻，再加上木頭桌面本身的熱傳導，水滴結冰的過程呈現**兩頭平躺尖凸且中間又有一往上的冰尖凸**，形成非常逗趣可愛結冰體。
- 2.排成**ㄇ字型**時形成**兩個尖凸**，平躺的尖凸是木頭桌面的熱傳導所造成；往上的尖凸是因為二氧化碳氣流往唯一出口面擴散冷卻形成的。
- 3.推論四面圍上乾冰牆時，**冰尖唯一可能的發展方向是向上**。

### (四) 結論與感想

- 1.熱傳導在結冰的過程中佔了主要的影響，結冰過程都是由下向上發展。
- 2.冷卻氣流的方向，確實會影響水滴凝固的過程，因此也影響了冰尖凸的形成。
- 3.從木桌上白色軌跡，得知二氧化碳擴散的流動方向。
- 4.從肉眼觀察煙霧的流動，好像自己漫步在雲端的感覺，非常飄渺浪漫。

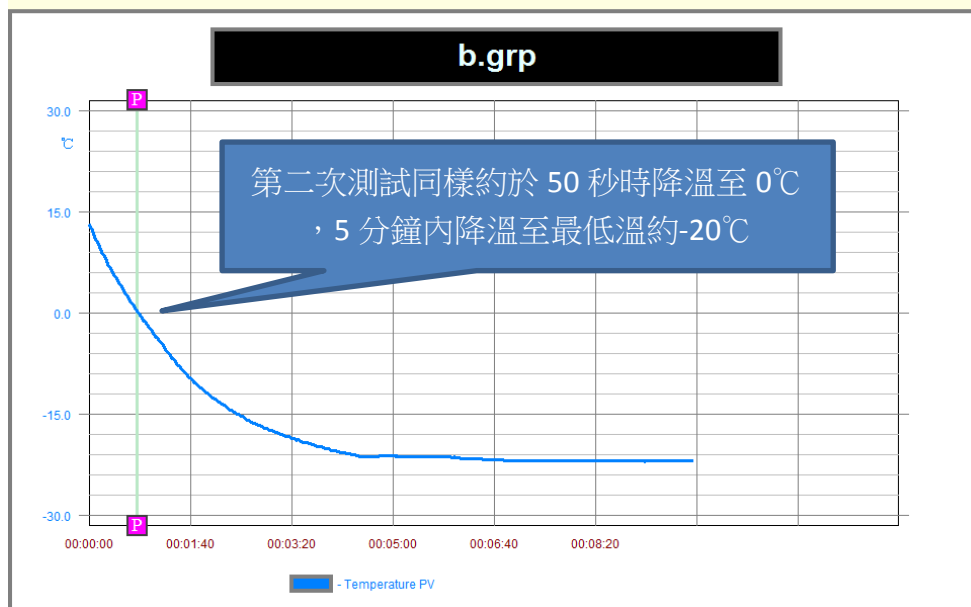
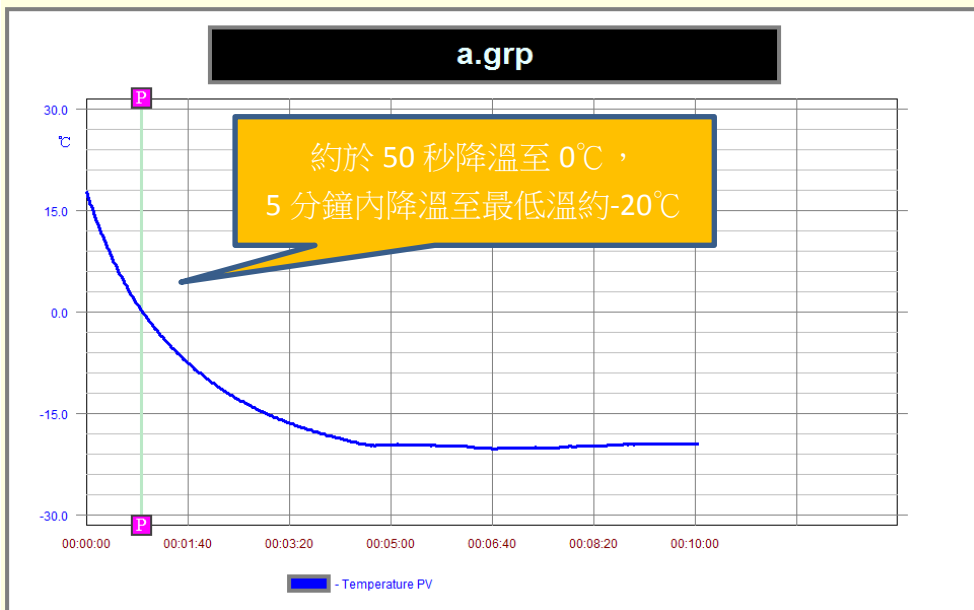
## 【研究五】四面圍上乾冰時，水滴量對結冰之影響。

### (一) 研究設計與方法

- 1.冷卻環境：以  $4 \times 4 \times 2\text{cm}$  厚的方體乾冰，立起來圍成一個中間  $4 \times 4\text{cm}$  的面積。並以溫度記錄器量測其內部溫度。
- 2.中間放入直徑  $15\text{mm}$  的圓形蓋玻片，分別滴上  $0.2\text{ml}$ 、 $0.3\text{ml}$ 、 $0.4\text{ml}$ 、 $0.5\text{ml}$ 、 $0.6\text{ml}$  的蒸餾水，紀錄**蒸餾水在木頭桌面上**的結冰時間並觀察其形狀的特徵。
- 3.為求實驗正確，每次實驗做五次求平均值。

### (二) 實驗結果：

- 1.透過儀器測試乾冰牆內部  $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$  的空間中，**木頭桌面上**測出來的溫度曲線呈現穩定的軌跡，如下圖。



2. 不論水滴體積的多寡，最後結冰時都結成斗笠狀。而且水滴體積愈大結冰時間愈久。記錄結冰所需時間詳如下表。

液滴量與結冰時間記錄表


單位：sec 溶液：蒸餾水

水滴量 測試次數	0.2ml	0.3ml	0.4ml	0.5ml	0.6ml
t1	385	422	510	575	615
t2	349	420	490	572	607
t3	360	404	482	580	610
t4	370	398	498	582	620
t5	372	412	480	577	617
平均	<b>367.2</b>	<b>411.2</b>	<b>492</b>	<b>577.2</b>	<b>613.8</b>

3.利用游標卡尺量測未結冰時水滴的高度以及結冰後的高度，換算結冰過程高度的變形比。如下表。

水滴原始高度及結冰後變形高度測記錄

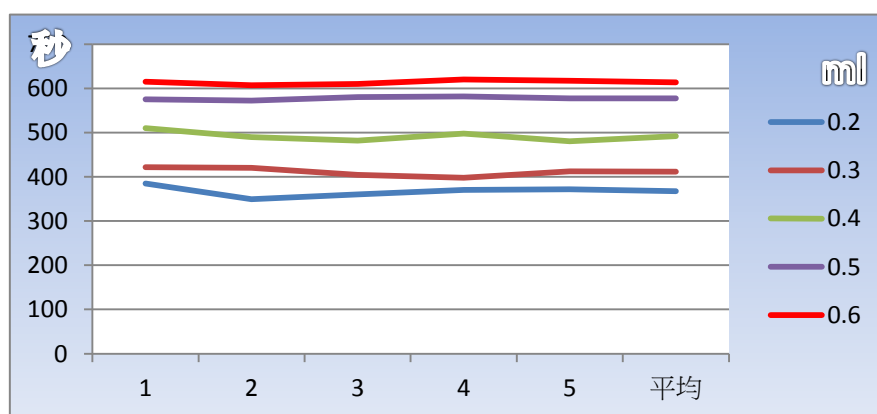
單位：mm 溶液：蒸餾水

水滴量 (ml)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
原始高度	2.1mm	3.0 mm	3.6 mm	4.0 mm	4.5 mm
h1	4.6	6.3	7.5	8.3	9.5
h2	4.3	6.4	7.4	8.4	9.2
h3	4.5	6.6	7.7	8.5	9.4
h4	4.7	6.3	7.3	8.4	9.2
h5	4.4	6.5	7.4	8.4	9.3
平均凝固高度	4.5	6.46	7.46	8.4	9.32
高度變形比	2.14 倍	2.15 倍	2.07 倍	2.1 倍	2.07 倍
形狀	斗笠狀	斗笠狀	斗笠狀	斗笠狀	斗笠狀
觀察照片					

### (三) 結果討論：

1.不管水滴的體積為何，每顆水滴結冰時都結成**斗笠狀**。水滴結冰時體積會膨脹，因為底面積固定，所以體積只好往上膨脹。而且因為二氧化碳氣流明顯，加上底面積固定的緣故，水滴結成固體的過程是圓型周圍與底部先結冰，形成一個像眼珠子瞳孔一樣，只剩下中間是透明的。如果再繼續結冰之後，**瞬間冰體的弧度變陡且變慢慢變霧，便形成斗笠狀**。

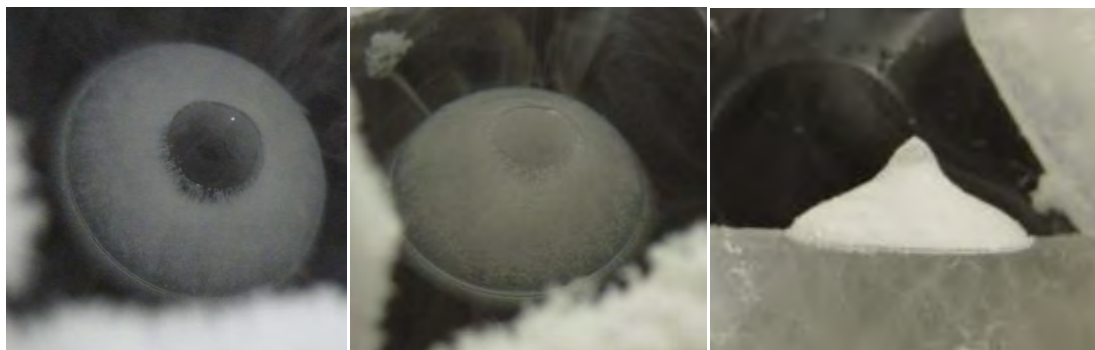
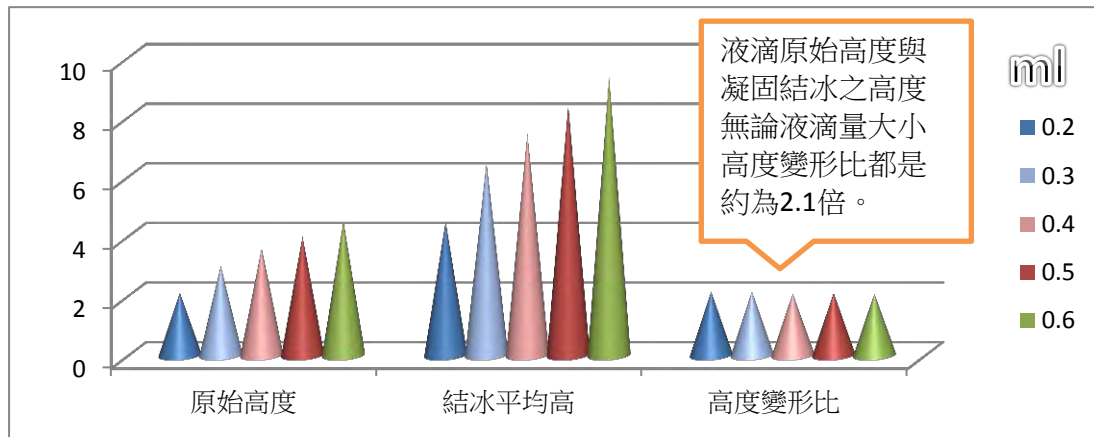
蒸餾水水滴量與結冰時間數值分析圖（表）



2.以游標卡尺測得未結冰時水滴本身的高度及結冰後之高度，換算結冰過程高度的變形比。**與去年科展作品獲得不同的結果，發現是變形比並不隨著體積改變而有所差異，大約是維持在 2.1 倍左右**。這是否證明了四塊乾冰昇華的冷氣流

風向往中間吹真的會讓冰點的高度變為更高，那個斗笠狀的陡度轉折點是否證明底部與周圍都已結冰時液體只能奮力往上凸起呢？也就是很強的風向確實會影響冰體的外觀。

蒸餾水液滴高度與結冰後高度數值分析圖



蒸餾水結冰過程中間處最慢結冰，最後轉折變陡結成斗笠狀

#### (四) 結論

1. 在相同的冷卻條件下，水滴量愈大，結冰所需的時間也愈久。
2. 不論水滴量多少，水滴結冰高度變形比約為 2.1 倍。
3. 底部及周圍先結冰，最後弧度變陡結成斗笠狀的結冰體。

### 【研究六】探討不同液體在四面圍乾冰的空間內結冰的情形

#### (一) 研究設計與方法：

1. 同研究(五)，在木頭桌面上，將蒸餾水滴換成重量百分率 5% 的糖水實驗。
2. 同上述，再以重量百分率 5% 的硫酸銅溶液實驗，重覆上述實驗。
3. 比較蒸餾水、糖水、硫酸銅溶液的結冰現象。

#### (二) 實驗結果






1. 不論糖水溶液體積大小，最後結冰時都形成扁桃狀。而且體積愈大，所需的時間愈久。實驗觀察記錄，詳如下表。



結冰時間記錄表（5%糖水）

液滴量 測試次數	0.2ml	0.3ml	0.4ml	0.5ml	0.6ml
t1	349	393	490	523	595
t2	337	397	488	506	590
t3	330	420	471	503	610
t4	340	413	473	529	608
t5	346	418	498	531	614
平均	<b>340.4</b>	<b>408.2</b>	<b>484</b>	<b>518.4</b>	<b>603.4</b>

高度及變形記錄表（5%糖水）






液滴量 (ml)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
原始高度	2.0mm	2.8 mm	3.3 mm	3.8 mm	4.4 mm
h1	2.6	3.7	4.6	5	6.3
h2	2.8	3.6	4.6	5.3	6.2
h3	2.8	3.8	4.5	5.4	6.3
h4	2.9	3.9	4.6	5.3	6.1
h5	2.7	3.7	4.7	5.1	6.0
平均結冰高度	2.76	3.74	4.6	5.22	6.18
高度變形比	1.38 倍	1.33 倍	1.39 倍	1.37 倍	1.4 倍
形狀	扁桃狀	扁桃狀	扁桃狀	扁桃狀	扁桃狀
觀察照片					

2. 硫酸銅溶液結冰實驗記錄顯示，結冰時形成像鍋蓋狀尖凸。而且體積愈大形成的尖凸也愈明顯。詳如下表。


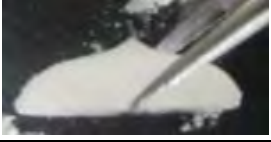


結冰時間記錄表（5%硫酸銅溶液）

液滴量 測試次數	0.2ml	0.3ml	0.4ml	0.5ml	0.6ml
t1	406	439	510	565	600
t2	411	450	520	559	592
t3	378	461	530	562	608
t4	385	468	489	581	613
t5	390	458	500	572	610
平均	394.5	455.2	509.8	567.8	604.6

高度及變形記錄表（5%硫酸銅溶液）

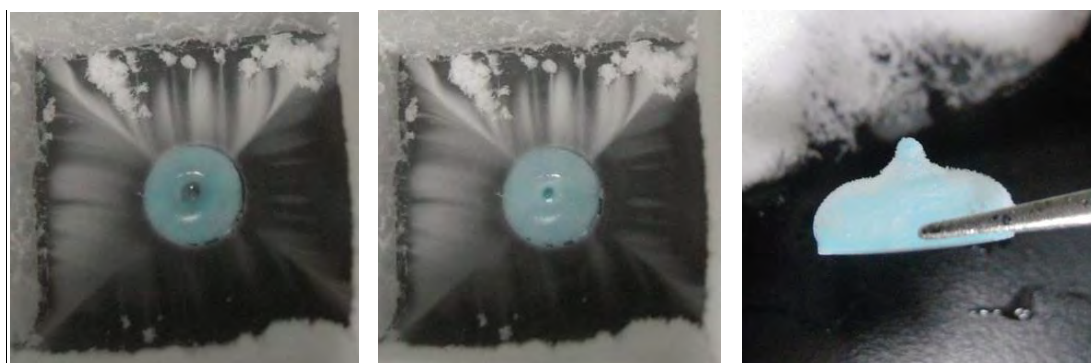
液滴量	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
原始高度	2.0mm	2.7 mm	3.3 mm	4.0 mm	4.4 mm
h1	4.4	5.2	6.5	7.8	8.7
h2	4.3	5.2	6.5	7.5	8.8
h3	4.3	5.3	6.5	7.6	8.3
h4	4.2	5.3	6.4	7.7	9.4
h5	4.2	5.1	6.6	8.0	9.2
平均結冰高度	4.28	5.22	6.5	7.72	8.88
高度變形比	2.14 倍	1.93 倍	1.97 倍	1.93 倍	2.01 倍
形狀	鍋蓋狀	鍋蓋狀	鍋蓋狀	鍋蓋狀	鍋蓋狀
觀察照片					

3.分別取 0.4ml 的各項溶液（蒸餾水、糖水、硫酸銅溶液、鹽水液滴）觀察結冰現象，結果整理如下表。

溶液種類	原始高度	結冰高度	高度變形比	結冰過程形狀觀察記錄	觀察照片
蒸餾水	3.6	7.46	2.07	冰凸明顯呈斗笠狀 表面乾爽、朦朧感	
糖水 5%	3.3	4.6	1.39	有最矮的冰凸呈扁桃狀 表面濕面	
5%硫酸銅溶液	3.3	6.5	1.97	有最瘦尖的冰凸 表面乾爽、朦朧感	
鹽水 5%	----	----	----	無冰凸、初始表面濕面 繼續冷卻結晶	

### (三) 研究討論：

跟去年科展作品不同的是，重量百分率 5% 的糖水與 5% 硫酸銅溶液竟然也都產生冰尖凸，而且結冰的冰體外觀大不相同。糖水結冰是扁桃狀，變形比最少；硫酸銅溶液結冰最後過程中，只剩下中間是澄清的藍色部分而且感覺有些塌陷，但是最後塌陷處像火山口一樣慢慢又冒出液體出來，液體慢慢的結冰又長出瘦瘦的尖凸。



0.6ml 的硫酸銅溶液剛開始邊緣先結冰，中間會慢慢塌陷，最後慢慢凹陷處冒出液體又結冰

我們推斷硫酸銅溶液結冰過程中，底部與外圍受到極冷的環境作用，純物質或低濃度溶液會先結冰，所以把高濃度的硫酸銅溶液往中間推，才會覺得中間結冰速率突然變慢而且塌陷，但是周圍環境還是很低溫，造成液體不得不結冰，最後完成瘦尖的冰尖凸。我們仔細觀察糖水結冰時，感覺溶液好像變得不是很均勻，應該也是純物質先結冰，高濃度糖水往中間推的緣故。

至於重量百分比 5% 的食鹽水，中間沒有發現冰尖凸，但卻發現有從圓形底部側緣開始產生漂亮的結晶(染紫色更明顯)的特殊現象。當晶體跟晶體長大後會互相擠壓，甚至還擠出好多個像浪花的突起。如圖所示。因為鹽水結冰中間沒有尖凸，所以並沒有做變形比的探討。



### (四) 結論

1. 用 5% 的糖水與 5% 硫酸銅溶液結冰後都能產生冰尖凸，鹽水則不會有尖凸。
2. 糖水結冰後的形狀是扁桃狀，變形比最少，蒸餾水形成斗笠狀，硫酸銅溶液則是有點鍋蓋的形狀，尖凸的部分特別瘦也特別尖。
3. 在 5% 的食鹽水結冰方面並沒有發現冰尖凸，但表面的晶體跟晶體長的過程會互相擠壓，形成一些像浪花的突起。

## 【研究七】如何用乾冰做台灣

用乾冰可以讓液滴結冰產生尖凸，我們靈機一動，嘗試著應用研究中學到的知識，透過冰尖凸與結晶秀，做出漂亮的台灣立體地形。

### (一) 研究設計與方法

- 1.將水滴滴在乾冰上，觀察水滴結冰情形。
- 2.運用烙印方式，在乾冰製作出的凹槽中倒入液體，觀察變化。
- 3.取出台灣鋁片，將 12ml 染綠色的蒸餾水液體，灌入烙印有台灣形狀的乾冰中，觀察液體的結冰情形。
- 4.將蒸餾水液體改為等體積的重量百分率 5% 橘色糖水、5% 重量百分率紫色鹽水、5% 重量百分率硫酸銅溶液等等，觀察台灣結冰的情形。
- 5.將台灣鋁片留在乾冰內，同上步驟重做一次，比較台灣結冰的情形有何差異。

### (二) 實驗結果：

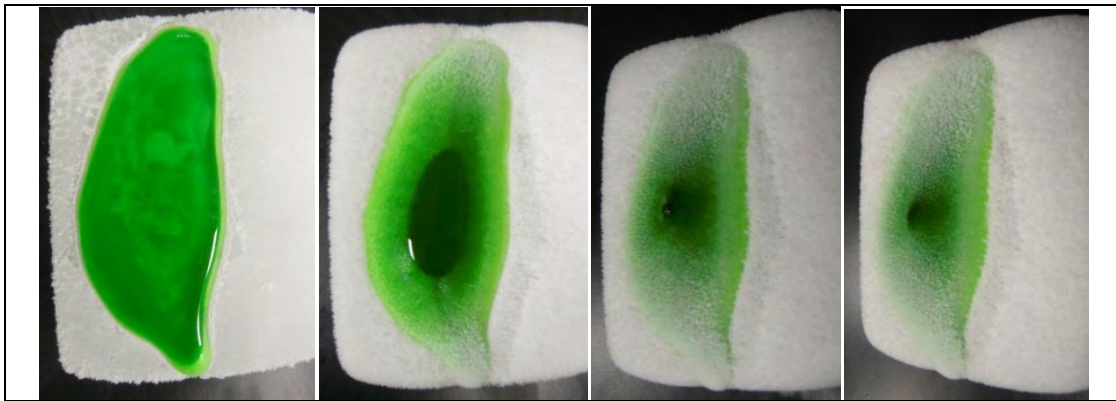
- 1.水滴在乾冰上不僅成為球狀，而且快速滾落桌面。這是因為水滴在乾冰的那一刻，水滴的溫度是 25°C，乾冰的溫度是 -78.5°C，也就是乾冰會因為外在的高溫作用(對 -78.5°C 而言，室溫 25°C 是非常高的溫度)迅速昇華成二氧化碳。**產生的大量二氧化碳就像一層氣流一樣覆蓋在乾冰的表面上，減少摩擦力，讓水滴無法停在乾冰上而滑落了。**這種現象就像鍋子很熱時，水會結成珠狀在鍋子裡滾來滾去的道理一樣。
- 2.為了解決水滴滑落，我們拿一塊大金屬鋁片，用大剪刀剪出台灣形狀，再用鐵槌敲平金屬片。以 3~4 個小蠟燭台同時加熱，用鑷子夾起金屬薄片在火上烤，烤熱後迅速烙印台灣形狀於乾冰上。並且重複烙印直到做出 3mm 深的台灣形狀乾冰。如圖所示



將鋁片剪製台灣形狀，以蠟火加熱後烙印在乾冰塊上

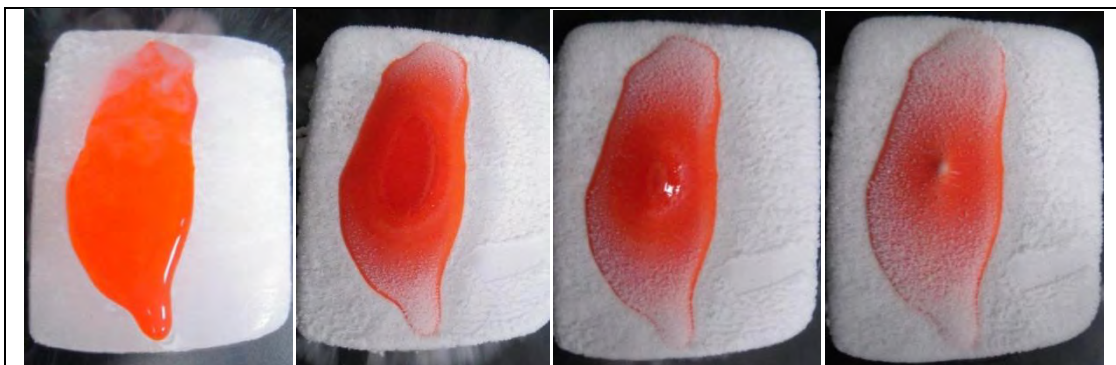
- 3.取出台灣鋁片，將 12ml 綠色蒸餾水液體灌入烙印有台灣形狀的乾冰中，觀察液體的結冰情形。我們以為灌入液體應該很順利，沒想到二氧化碳不斷地快速昇華冒出，像極了噴泉。**乾冰上台灣形狀製作時一定要非常平整，烙印的台灣深度要一致(約 3mm)，**液體才不會滑落桌面上。我們觀察到液體灌入乾冰內必須等到底部液體完全結成冰之後，二氧化碳才不會一直冒出。待底部結冰之後，

美麗的中央山脈也漸漸長出，由之前實驗得知，蒸餾水會長出冰尖凸，所以台灣地形最後是中心點附近冒出一最高點，就好像台灣最高峰玉山一樣。



烙印乾冰後，取出台灣鋁片倒入綠色蒸餾水溶液的結冰情形↑

4. 染紅色的糖水也有形成中央山脈但並沒有特別高聳，較特別的是藍色的硫酸銅溶液中間的山脈凸起特別高而且瘦尖；紫色的鹽水溶液結成冰之後，只有體積膨脹造成中間有一隆起，沒有長出中央山脈。但我們觀察到結冰紋理從邊緣開始長出往中間擴展，慢慢地將整個台灣覆蓋住。若再繼續冷卻，周圍的水蒸氣也結霜覆蓋在台灣上，形成一個沒有中央山脈但有小台地隆起的台灣，如圖。



烙印乾冰後，取出台灣鋁片倒入橘色 5%糖水溶液結冰觀察↑



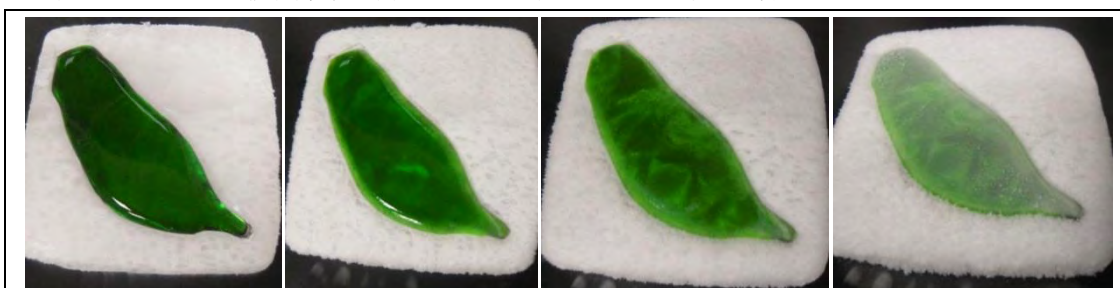
烙印乾冰後，取出台灣鋁片倒入藍色 5%硫酸銅溶液結冰觀察↑



烙印乾冰後，取出台灣鋁片倒入紫色 5%鹽水溶液結冰觀察↑（結冰紋理從外往內形成）

5.當**金屬片不取出時**，二氧化碳不會從台灣內部冒起，我們很輕易可以在金屬鋁片上滴上 12ml 液體，**液體也會快速地均勻結冰**。令人意外的是蒸餾水、糖水、鹽水的台灣等，都沒有長出中央山脈，**唯一有長中央山脈只有硫酸銅溶液**，如下圖所示。我們還發現硫酸銅溶液的結冰面上有一點一點的小凸點，而且中央山脈也很瘦尖，一連做了好幾次實驗都得到同樣結果。我們還發現一個特殊現象，**硫酸銅溶液在最後長冰尖凸時，結冰速率突然變慢，時間變得很久**。這證明當液體體積較多時(12ml)，確實發現混合物(硫酸銅溶液)會花更久的時間結冰，**當純物質或低濃度先結冰後，高濃度的硫酸銅溶液往中間推，所以才花更久的時間結冰**。由此實驗結果與研究五、研究六的四面乾冰牆實驗做比較，之前蒸餾水、糖水、硫酸銅溶液的小液滴結冰時間快慢沒有差別，應該是液滴的體積量太少(0.6ml)，乾冰又無法切得很完美、乾冰冷源的供應太強，導致最終結冰時間差異不大。

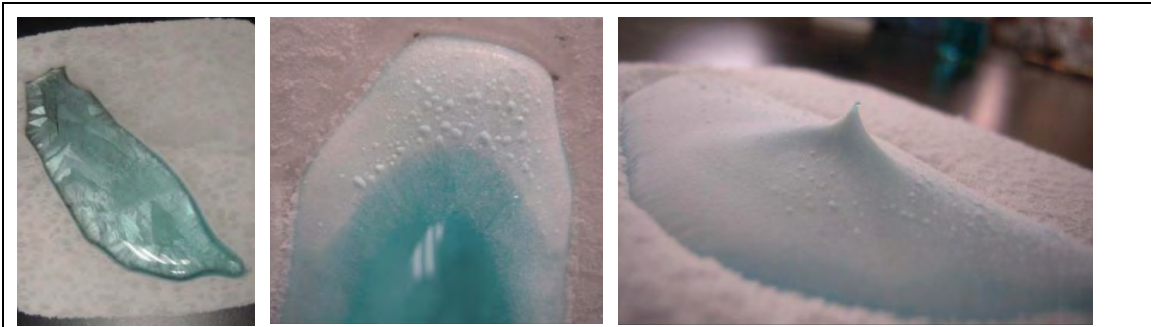
我們感到驚喜的還有鹽水的實驗，**金屬片留在乾冰上**，染了紫色的台灣黑夜夜空，結成冰之後卻在一瞬間長出非常美的結晶花，與之前**直接滴在乾冰上不同的是，晶體紋理除了邊緣先長出之外，中間處還會一顆一顆從底部慢慢長出**，**結晶花長出的過程約一分鐘內結束，但台灣的美卻成永恆，永遠留在我們的心中**。如下圖所示。結晶花互相碰撞後水平方向無法繼續結冰，只好繼續往上擠出一些浪花，跟之前蓋玻片實驗會有一些浪花突起的感觉一樣。



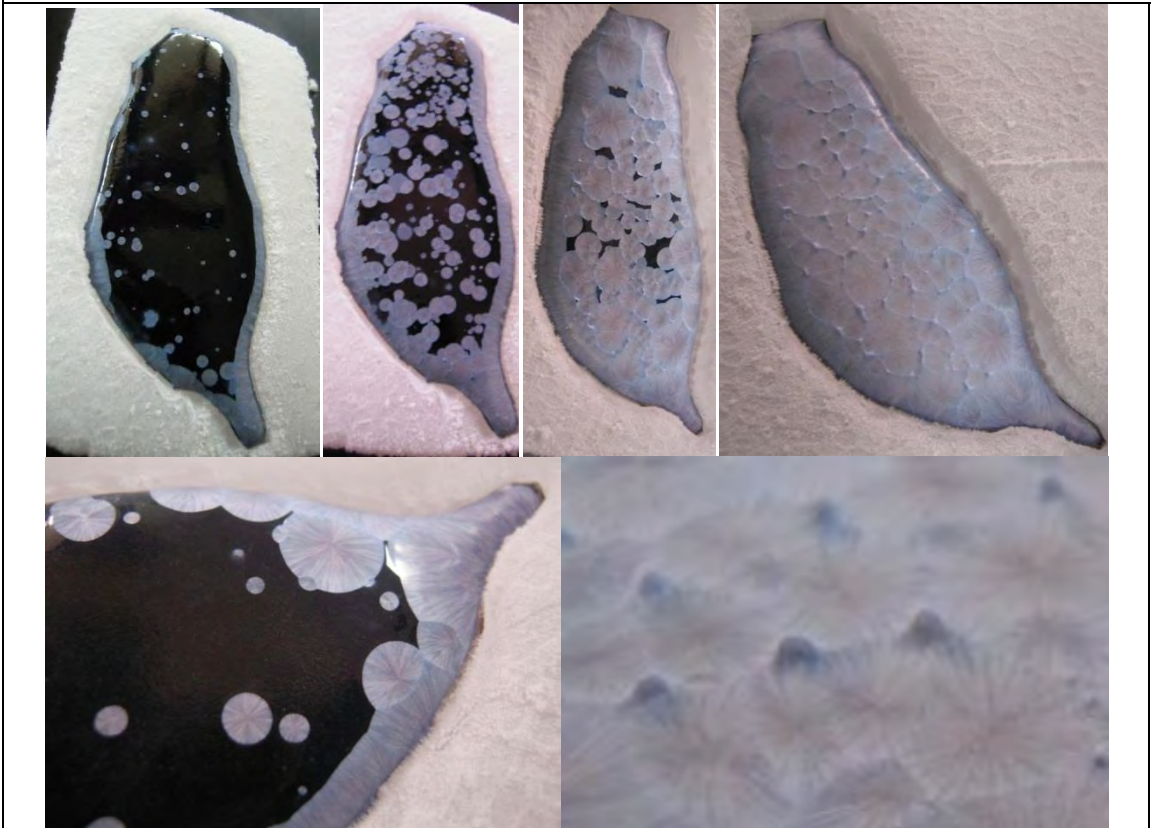
乾冰內墊鋁片的綠色蒸餾水溶液結冰情形 ↑



乾冰內墊鋁片的 5%橘色糖水溶液結冰情形 ↑



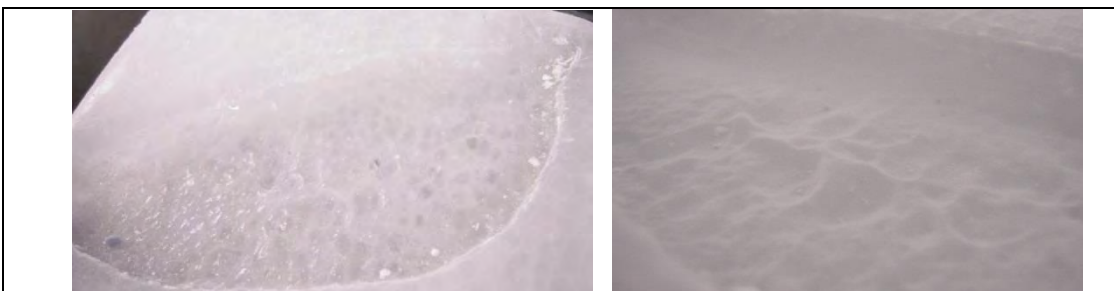
乾冰內墊鋁片的 5%藍色硫酸銅溶液結冰情形 ↑ (同樣有冰尖產生)



乾冰內墊鋁片紫色鹽水結冰情形 ↑ (結晶花碰撞後產生的浪花突起近拍觀察 ↑)

### (三) 研究討論

以上的實驗跟之前用蓋玻片的結冰實驗有些相似的結果，值得探討的是沒有金屬鋁片結成的每一個台灣冰塊取出後，底下的乾冰都產生不規則的腐蝕孔洞，推論應為液滴直接作用在乾冰上的昇華速率不一致所導致。如下圖所示。



乾冰昇華成二氧化碳在台灣結冰底部留下的腐蝕孔洞

為什麼金屬片留在乾冰內的台灣較不長出高山呢?而乾冰台灣底部也不會留下孔洞呢?我們得到一個推論:那就是鋁片上的液體瞬間受到均一極低溫冷卻系統瞬間結冰,而乾冰昇華成二氧化碳的氣體,往台灣液體吹的效應不明顯,金屬熱傳導速度極為快速,結冰的方式感覺是整個台灣底層均勻結冰而往上膨脹撐起,也就是台灣底部結冰的速度非常快(幾乎是在零下五六十度),**根本沒有時間慢慢結冰,當然來不及產生冰尖凸。也因為金屬片墊著,所以液體沒有直接接觸乾冰表面,所以不產生侵蝕孔洞。**

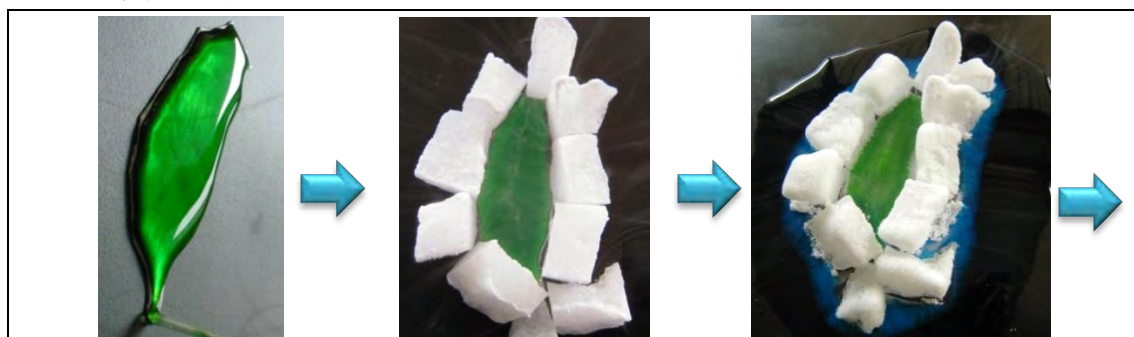
## 【研究八】藍色大海美麗寶島

同學們愈做愈起勁,竟然希望做出有海浪環繞,有中央山脈紋路的台灣,我們又絞盡腦汁想出了下面的實驗。

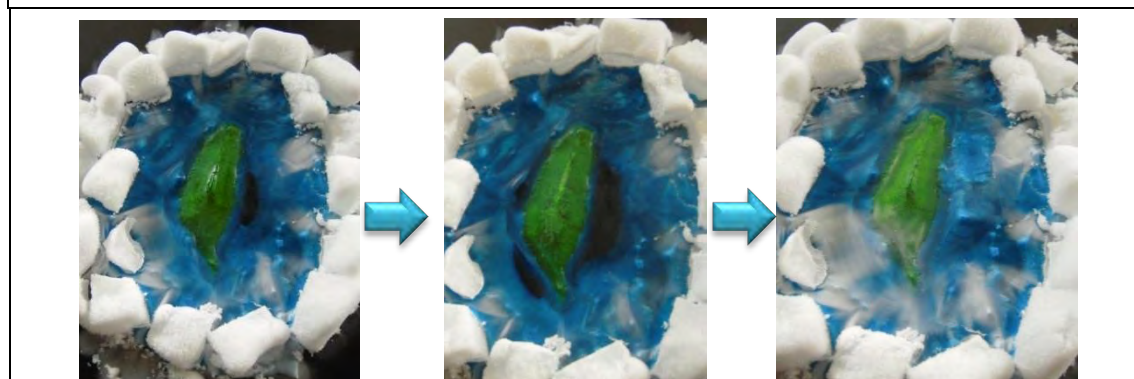
### (一) 實驗設計與方法

- 1.將金屬鋁片上滴上綠色蒸餾水液體,在台灣周圍排上一圈的乾冰。
- 2.當台灣周圍都有乾冰後,再將藍色蒸餾水滴在台灣的外圈,等台灣完全變成冰塊,海洋也慢慢結冰。再將乾冰移至最外圍,讓最外圍藍色的大海也能結成冰。
- 3.移走乾冰後留下的空白處再以藍色蒸餾水補上。最外圍的乾冰可以再加一些,讓乾冰冷卻的氣流能讓台灣本島繼續維持低溫冰凍,且本島旁邊的藍色蒸餾水也可以加速結冰。

### (二) 實驗結果



1.將綠色蒸餾水滴在台灣鋁片上 2.周圍圍上乾冰 3.快完全結冰時在周圍倒入藍色蒸餾水溶液



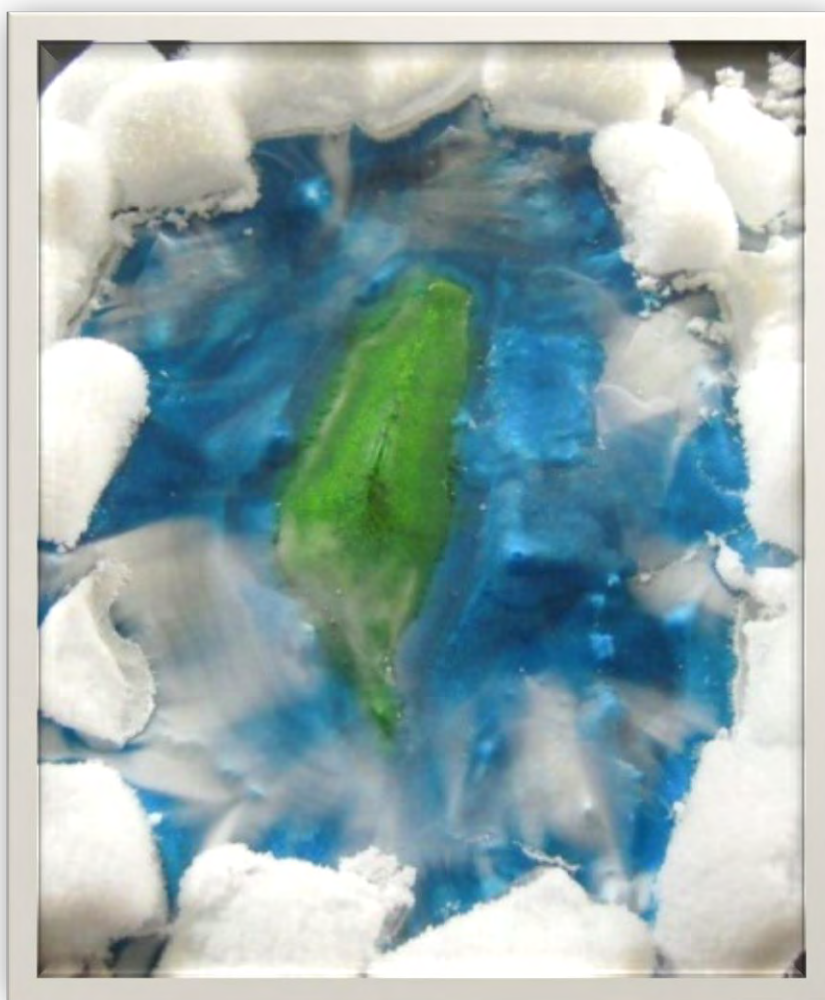
4.在最外緣也圍上另一圈乾冰製造美麗大海,當台灣完全結冰後,拆掉內圈乾冰。在空白處補上藍色蒸餾水,繼續冷卻即可。



將綠色蒸餾水滴在台灣鋁片上，直接以乾冰包圍接觸液體過程中，最具挑戰的是控制中央山脈冰尖凸的形成位置，經過前面的實驗研究，我們為了要讓冰尖凸靠向右側，就必須將左側的乾冰放入較大塊且數量多於右邊的乾冰，才能讓液體導向偏右的方向長尖凸。而大海的形成則可以同步地在乾冰周圍倒入所需的藍色蒸餾水溶液，結冰後即可產生藍色的大海，也會有隨機形成的波浪產生。

### （三）研究討論

本實驗是直接以乾冰接觸液體，利用熱傳導與乾冰昇華產生二氧化碳冷氣流兩種方式來冷卻液體，並且陸續調整乾冰位置，持續控制冷卻的進行。以綠色蒸餾水做為基本材料，正好可以有綠色台灣的效果。只是在製作海洋時乾冰外移，會因為冷的傳導不足，而有一些融化的現象。但經過一些時候又會重新凝固結冰。海洋因為結冰的關係也會膨脹長出冰尖凸，遠遠看藍色冰尖凸就像是海浪的浪花一樣美麗。



## 伍、討論

在研究一的擴散實驗中，我們會擔心乾冰的切塊不均影響實驗結果，但是 60 克乾冰的實驗卻很順利的完成，所以實驗誤差較小。但我們沒有對蒸餾水、糖水、鹽水、硫酸銅溶液做冷卻結冰的時間做比較，是因為在口字型乾冰牆實驗時，乾冰切割每塊大小要一模一樣是很困難的，所以乾冰牆中間溫度還是有些許誤差，而且液滴的體積量太少、濃度又太低(重量百分比 5%)，所以數據的比較無法明顯比出來。但是做台灣地形實驗中，混合物 5%糖水、鹽水、硫酸銅溶液的結冰時間真的都比純物質蒸餾水還久，尤其是 5%硫酸銅溶液結冰的時間最久，代表 12ml 的乾冰槽台灣結冰實驗，混合物結冰時確實發生高濃度往中間移動的現象。這跟我們吃冰棒時感覺越吃越甜，或是剛開始很甜越吃越不甜，冰棒結冰過程中純物質或低濃度糖水先結冰，高濃度糖水慢結冰的道理一樣。

這個實驗主要探討熱傳導與對流兩者的競爭關係，當金屬桌面與木頭桌面的材質差異會影響水滴結冰的形狀。熱傳導強烈時乾冰周圍水滴的結冰會是立起來的冰凸(金屬材質上的水滴結冰)，熱對流強烈時乾冰周圍的水滴會是躺平的尖凸(木頭桌面的水滴結冰)。冷氣流的風向會決定尖凸的形狀及方向，強烈的氣流靠近乾冰越近，越快結冰。但是乾冰槽台灣結冰實驗中，放入金屬片的台灣不會產生冰尖凸，是因為金屬片熱傳導太旺盛了，液體滴入後馬上結冰，根本來不及慢慢長冰尖凸，但硫酸銅溶液因為結冰過程高濃度往中間推，雖然金屬片熱傳導旺盛，最後還是因為高濃度很慢結冰所以有時間長出冰尖凸。

## 陸、心得感想

能夠利用科展的機會做出美麗的台灣真是一個很棒的經驗，我們很感激去年的科展得獎作品讓我們有這個靈感重新體會科學的樂趣。愛台灣是隨時隨地以任何方式呈現的一種感動，我們只能說，科學是一種藝術，經過我們不斷地嘗試，我們將科學與人文做巧妙的結合，不僅豐富的我們的想像空間，也留下一個美好的回憶。

從一開始我們為了觀察認識乾冰的特性，再從霧狀水滴的飄移累積「驗證」書本上學到的擴散作用。接著還有一連串有關結冰的實驗發想，都是在設計及實驗過程中萌發的，讓我們完成一系列有趣的實驗中充滿驚喜。最後，當然我們也克服萬難，完成以乾冰塑台灣的科技藝術品—「藍色大海、美麗台灣」。

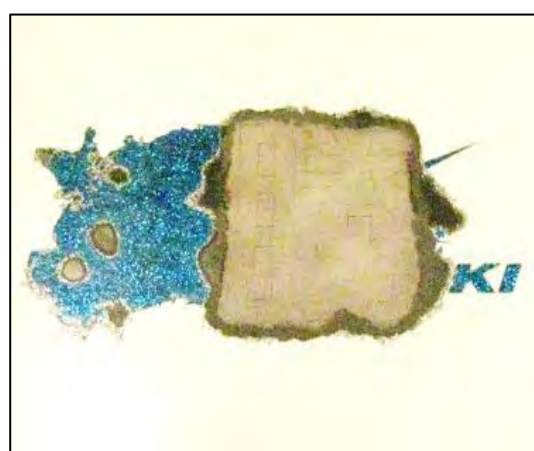
科學的操作與驗證是一種最真實的學習，透過「親眼看見結冰」的過程，見證科學、分析現象、推論結果，真是收獲滿滿。也希望這一次科展研究的過程中學到的知識與態度，開啟對科學的熱情與興趣，讓我們一直「科學」下去。

## 柒、參考資料及其他

- 1.不可思議的小尖冰~探討水珠結冰的特殊現象。中華民國第 52 屆中小學科學展覽會，國小組物理科 080113，高雄市三民區東光國民小學。
- 2.冰冰有理 - 關於糖水結冰濃度梯度的研究。中華民國第 45 屆中小學科學展覽會，國中組物理科 031625，苗栗縣苗栗國中。
- 3.海水結冰時得鹽度變化-海水是什麼味道?科學教育月刊 第 255 期 中華民國九十一年十二月
- 4.生命的答案水知道 江本 勝著 長安靜美 譯 ISBN 957-607-831-8

## 後記:


就在科展乾冰實驗告一段落的時候，██████的媽媽剛好 4 月份到日本出差看工業科技展，無意間看到一種”乾冰清洗機”的機器，覺得很新奇就拍照跟我們分享。那是一台裝有碎乾冰的機器，機器接上一個噴嘴，噴嘴噴出的乾冰微粒和二氧化碳的氣體竟然可以將不沾鍋的烤漆拔除，甚至將汽車的烤漆連根拔起。有另一家塗漆達人號稱他的塗料永遠不會掉落，經過噴槍噴灑 20 分鐘後竟然看到底部鋼板。如圖所示。



我們想了一下科學的原理，那是因為噴出的二氧化碳非常低溫，可以讓周圍溫度瞬間達到零下 78 度，所以會將表面的樹脂、髒汙瞬間冷卻脆化，乾冰噴出

後讓樹脂等污垢附著物與金屬模具間的空隙,因為乾冰昇華成二氧化碳而體積膨脹 750 倍,加上噴嘴衝力沖刷,所以污垢容易剝落乾淨。如下頁圖所示。

我們不得不佩服日本大膽研發創新的勇氣,經過這次的科展經驗,我們真的再一次認識乾冰這種神奇的物質,希望未來我們也能研發出新的應用。



日本プラスチック工業連盟誌  
**プラスチック 10**  
Japan Plastics  
2012  
特集:プラスチック成形の効率化を探る 特設記事:難燃剤

**DRY-ICE POWER**

付着物を剥がし落とす、ドライアイス洗浄。

GREEN TECH  
DRY-ICE CLEANING SYSTEM  
JAPAN

### 剥離の原理

**洗浄前**

壁表面  
付着物

洗浄対象物にドライアイス洗浄する

**洗浄中**

ドライアイスペレット  
除去された付着物

①付着物に-79℃のドライアイスを噴射することにより表面温度が急激に低下し、熱収縮によって脆くなる  
②付着物の隙間にドライアイスが入り込み、750倍の体積膨張が発生する。

# SYSTEM システム

～将来のノズルマンの皆様～  
洗浄システムを会得することがプロフェッショナルへの近道です

ドライアイス洗浄は、洗浄機本体に工場エア(コンプレッサーによる圧縮空気)をジョイントし、購入したドライアイスペレット3mmタイプを専用BOXから洗浄機本体に入れる。ノズルマンがガンスイッチをオンにすることで、混合されたエアとドライアイスが加速してノズルから洗浄対象物に吹きかけて付着物を剥離します。

スクリュー型  
コンプレッサー





ドライアイスペレット

安全保護具

ドライアイス洗浄機

排気

### ドライアイス洗浄の特長

ドライアイスの性質を利用した高い剥離能力  
→120℃の溶融材料によるセーマルショック効果とドライアイス射撃時の体積膨張効果(熱を帯びたワークから弾に効果的)

ワークに傷をつけにくい  
→ドライアイスは柔らかい物質のため破壊力が低く、傷痕も僅か(付着)


プラスチックが残らないため、後処理の時間短縮やコスト削減に有効  
→ドライアイスは液体にならず直接固体から気体へと戻る

### 剥離の原理

**洗浄前**

壁表面  
付着物

洗浄対象物にドライアイス洗浄する



## 【評語】 080110

乾冰昇華吸熱致使周邊的水氣凝結為雲、霧、霜或冰，增添其多元性。本作品利用乾冰冷卻週過流體之不均勻性探究氣體擴散、溶滴凝結等現象，並創新的利用凝結過程的不均勻性與脹縮創作如台灣等造型具獨特的藝文性，唯科學性之定量分析與整體性可更加強。